

GYROLASER A ETAT SOLIDE STABILISE ET A MILIEU LASER ANISOTROPE

Le domaine de l'invention est celui des gyrolasers à état solide utilisés en tant que centrale inertielle. Ce type d'équipement est notamment
5 utilisé pour les applications aéronautiques.

Le gyrolaser, mis au point il y a une trentaine d'année, est largement commercialisé et utilisé de nos jours. Son principe de fonctionnement est fondé sur l'effet Sagnac, qui induit une différence de
10 fréquence $\Delta\nu$ entre les deux modes optiques d'émission se propageant en sens opposé dits contre-propageants d'une cavité laser en anneau bidirectionnelle animée d'un mouvement de rotation uniforme. Classiquement, la différence de fréquence $\Delta\nu$ est égale à :

$$\Delta\nu = \frac{4A\Omega}{\lambda L}$$

où L et A sont respectivement la longueur et l'aire de la cavité ; λ est la longueur d'onde d'émission laser hors effet Sagnac ; Ω est la vitesse de rotation de l'ensemble. La mesure de $\Delta\nu$, obtenue par analyse spectrale du
20 battement des deux faisceaux émis, permet de connaître la valeur de Ω avec une très grande précision.

On démontre également que le gyrolaser ne fonctionne correctement qu'au-delà d'une certaine vitesse de rotation nécessaire pour éviter le couplage entre modes. La plage de vitesses de rotation située en
25 deçà de cette limite est appelée classiquement zone aveugle.

La condition d'observation du battement, et donc de fonctionnement du gyrolaser, est la stabilité des intensités émises dans les deux directions. Son obtention n'est pas, à priori, chose aisée en raison du phénomène de compétition entre modes, qui fait que l'un des deux modes
30 contre-propageants peut avoir tendance à monopoliser le gain disponible au détriment de l'autre mode.

Ce problème est résolu dans les gyrolasers usuels par l'utilisation d'un milieu d'amplification gazeux, généralement un mélange d'Hélium et de Néon, fonctionnant à température ambiante. La courbe de gain du mélange gazeux présente un élargissement Doppler dû à l'agitation thermique des atomes. Les seuls atomes susceptibles de fournir du gain à un mode de fréquence donnée sont ainsi ceux dont la vitesse induit un décalage Doppler de la fréquence apparente de l'onde qui amène l'atome à résonance avec le mode en question. En forçant l'émission laser à avoir lieu ailleurs qu'au centre de la courbe de gain par ajustement piézoélectrique de la longueur du chemin optique, on s'assure que les atomes à résonance avec la cavité ont une vitesse non nulle. Ainsi, les atomes pouvant contribuer au gain dans l'une des deux directions ont des vitesses opposées à celles des atomes pouvant contribuer au gain dans la direction opposée. Tout se passe donc comme s'il y avait deux milieux amplificateurs indépendants, un pour chaque direction. La compétition entre les modes ayant ainsi disparue, on obtient une émission bidirectionnelle stable et équilibrée. En pratique, pour pallier d'autres problèmes, on utilise un mélange de deux isotopes différents du Néon.

Le caractère gazeux du milieu amplificateur est toutefois une source de complications techniques lors de la réalisation du gyrolaser notamment en raison de la grande pureté de gaz requise et d'usure prématurée lors de son utilisation, usure liée notamment aux fuites de gaz, à la détérioration des électrodes par les hautes tensions utilisées pour établir l'inversion de population.

Actuellement, il est possible de réaliser un gyrolaser à état solide fonctionnant dans le visible ou le proche infra-rouge en utilisant, par exemple, un milieu amplificateur à base de cristaux de YAG (Yttrium-Aluminium-Grenat) dopé au Néodyme à la place du mélange gazeux Hélium-Néon ; le pompage optique étant alors assuré par des diodes lasers fonctionnant dans le proche infra-rouge. On peut également utiliser comme milieu amplificateur un matériau semi-conducteur, une matrice cristalline ou un verre dopé avec des ions appartenant à la classe des terres rares (Erbium, Ytterbium, ...). On supprime ainsi, de facto, tous les problèmes inhérents à l'état gazeux du milieu amplificateur. Toutefois, une telle

réalisation est rendue très difficile par le caractère homogène de l'élargissement de la courbe de gain des milieux solides qui provoque une très forte compétition entre modes et l'existence d'un grand nombre de régimes de fonctionnement différents, parmi lesquels le régime bidirectionnel
5 équilibré en intensité et non verrouillé en fréquence dit "régime de battement" est un cas particulier et instable (N. Kravtsov, E. Lariotsev, Self-modulation oscillations and relaxations processes in solid-state ring lasers, Quantum Electronics 24(10) 841-856 (1994)). Cet obstacle physique majeur a fortement limité jusqu'à maintenant le développement des gyrolasers à état
10 solide.

Pour pallier cet inconvénient, une solution technique consiste à atténuer les effets de la compétition entre modes contre-propageants dans un laser en anneau à état solide en introduisant dans la cavité des pertes
15 optiques dépendant du sens de propagation du mode optique et de son intensité. Le principe est de moduler par un dispositif d'asservissement ces pertes en fonction de la différence d'intensité entre les deux modes émis afin de favoriser le mode le plus faible au détriment de l'autre, de façon à constamment asservir l'intensité des deux modes contre-propageants soit à
20 une valeur commune, soit à une différence constante. Techniquement, la réalisation du dispositif d'asservissement peut se fonder sur la combinaison de trois dispositifs optiques agissant sur l'état de polarisation des modes optiques. Ces trois dispositifs sont un polariseur linéaire, un rotateur réciproque ou une lame d'onde et un rotateur non réciproque (demande de
25 brevet français 03 03645).

L'objet de l'invention est de proposer un dispositif d'asservissement pour gyrolaser à l'état solide comportant un ensemble optique intracavité permettant de réguler l'intensité des modes optiques
30 contre-propageants, basé non plus sur des pertes optiques dépendant du sens de propagation, mais sur un gain optique dépendant du sens de propagation du mode optique et de son intensité. Le dispositif d'asservissement module alors le gain optique en fonction de la différence d'intensité entre les deux modes émis afin de favoriser le mode le plus faible
35 au détriment de l'autre, de façon à constamment asservir l'intensité des deux

modes contre-propageants à une valeur commune ou à une différence constante.

Plus précisément, l'invention a pour premier objet un gyrolaser
5 comportant au moins une cavité optique en anneau, un milieu amplificateur à l'état solide et un système d'asservissement, deux modes optiques dits contre-propageants pouvant se propager en sens inverse l'un de l'autre à l'intérieur de ladite cavité optique, le système d'asservissement étant destiné à asservir l'intensité des deux modes contre-propageants, caractérisé en ce
10 que le milieu amplificateur est anisotrope et que le système d'asservissement comporte au moins, à l'intérieur de la cavité, un ensemble optique comprenant un élément optique agissant sur l'état de polarisation des modes contre-propageants et un rotateur optique à effet non réciproque agissant également sur l'état de polarisation des modes contre-propageants, au moins
15 l'un des effets dudit élément optique ou dudit rotateur optique étant réglable.

L'élément optique est soit un rotateur optique réciproque soit une lame d'onde. Concernant le système d'asservissement, deux grands choix techniques sont alors possibles :

- 20 • soit l'effet de la rotation réciproque ou de la lame d'onde est fixe, dans ce cas, l'effet de la rotation non réciproque doit être réglable pour que le dispositif d'asservissement puisse fonctionner.
- 25 • soit l'effet de la rotation non réciproque est fixe, dans ce cas, l'effet de la rotation réciproque ou de la lame d'onde doit être réglable pour que le dispositif d'asservissement puisse fonctionner.

L'invention a pour second objet un gyrolaser comportant au moins une cavité optique en anneau, un milieu amplificateur à l'état solide et un
30 système d'asservissement, deux modes optiques dits contre-propageants pouvant se propager en sens inverse l'un de l'autre à l'intérieur de ladite cavité optique, le système d'asservissement étant destiné à asservir l'intensité des deux modes contre-propageants, caractérisé en ce que le milieu amplificateur est anisotrope, que la cavité est non plane, c'est-à-dire
35 que les deux modes contre-propageants ne se propagent pas dans un plan

unique et que le système d'asservissement comporte au moins, à l'intérieur de la cavité, un rotateur à effet non réciproque réglable.

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages
5 apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre donnée à titre non limitatif et grâce aux figures annexées parmi lesquelles :

- la figure 1 représente le principe de l'effet Faraday non réciproque.
- 10 • les figures 2a et 2b représentent le principe général du dispositif d'asservissement selon le premier mode de réalisation selon l'invention.
- la figure 3 représente le schéma général du dispositif d'asservissement selon le premier mode de réalisation selon l'invention.
- 15 • Les figures 4a et 4b représentent le principe général de la rotation réciproque induite par une cavité non coplanaire.
- la figure 5 représente la vue générale d'une cavité ~~monolithique~~.
- 20 • la figure 6 représente la vue générale d'un gyrolaser comprenant une cavité monolithique.
- la figure 7 représente le schéma de principe d'une cavité non planaire et monolithique.
- les figures 8a et 8b représentent les schémas de principe de la création d'un champ magnétique variable dans une cavité
25 monolithique à effet Faraday.
- la figure 9 représente le schéma de principe de la création d'un champ magnétique fixe dans une cavité monolithique à effet Faraday.

30 Une rotation optique de la polarisation d'une onde est dite non réciproque lorsque les effets de rotation de la polarisation se cumulent après un aller-retour de ladite onde dans un composant optique présentant cet effet. Le composant optique est appelé rotateur optique à effet non réciproque. Par exemple, les matériaux à effet Faraday sont des matériaux
35 qui, lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, font tourner le plan de

polarisation des faisceaux qui les traversent. Cet effet n'est pas réciproque. Ainsi, le même faisceau venant en sens inverse subira une rotation de son plan de polarisation dans le même sens. Ce principe est illustré en figure 1. La direction de polarisation 51 du faisceau 5 polarisé linéairement subit une

5 rotation d'un angle β lorsqu'elle traverse le composant à effet Faraday 8 dans le sens direct (schéma supérieur de la figure 1). Si l'on réinjecte dans le composant à effet Faraday un faisceau identique 6 se propageant dans le sens opposé et dont la direction de polarisation est initialement tournée de β , sa direction de polarisation 51 tourne à nouveau de l'angle β en traversant le

10 composant, l'angle de rotation total faisant alors 2β après un aller-retour (schéma central de la figure 2a). Dans un rotateur classique à effet réciproque 7, la direction de polarisation 51 aurait tourné de $-\beta$, de façon à retrouver sa position initiale (schéma inférieur de la figure 1).

15 Le principe de la combinaison d'une rotation réciproque et d'une rotation non réciproque est illustré sur l'exemple des figures 2a et 2b dans le cas de faisceaux incidents 5 et 6 polarisés linéairement. L'indication de direction de polarisation des faisceaux optiques a été représentée par une

20 flèche. Le premier élément 7 à effet réciproque fait tourner la polarisation de la lumière d'un angle α dans le sens direct et le second élément 8 fait tourner la polarisation d'un angle β également dans le sens direct. L'élément 7 peut notamment être un rotateur optique naturel comme une lame de quartz. Ledit

25 élément 7 peut être également une lame d'onde, comme par exemple une lame demi-onde tournée d'un angle $\alpha/2$ par rapport à la direction de l'onde incidente. L'élément 8 peut être un rotateur de Faraday comme

30 précédemment cité. Soit un premier faisceau optique 5 polarisé linéairement verticalement et traversant successivement le premier et le second élément comme illustré en figure 2a, après la traversée du premier élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle α et après la traversée du

second élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle θ_{direct} égal à $\alpha + \beta$. Soit un second faisceau optique 6 polarisé linéairement et traversant successivement en sens inverse du premier faisceau 5 le second puis le premier élément comme illustré en figure 2b, après la traversée du second

élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle $-\beta$ et après la

traversée du premier élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle θ_{inverse} égal à $\alpha - \beta$.

Un milieu laser anisotrope présente la particularité d'avoir une
5 émission stimulée polarisée selon une direction privilégiée. Ainsi, pour qu'un faisceau optique traversant ledit milieu soit amplifié avec un gain maximum, il doit être polarisé dans cette direction privilégiée. Dans une direction perpendiculaire à cette direction privilégiée, le milieu laser peut présenter un gain mais en général, la valeur de ce gain est très voisine de l'unité et elle ne
10 permet pas d'obtenir un effet laser. A titre d'exemple non limitatif, on citera, comme milieu laser anisotrope de ce type, des milieux cristallins comportant une matrice YVO_4 ou une matrice YLF comportant des ions Néodyme Nd^{3+} .

La figure 3 décrit le principe général du gyrolaser selon le premier
15 mode de réalisation selon l'invention. Il comporte une cavité laser à 3 miroirs 11, 12 et 13, ladite cavité comprenant un rotateur réciproque ou une lame d'onde 7, un rotateur non réciproque 8 similaires à ceux des figures 2a et 2b et un milieu laser anisotrope 19. A titre d'exemple, le premier élément 7 a un effet réciproque fait tourner la polarisation de la lumière d'un angle α dans le
20 sens direct et le second élément 8 fait tourner la polarisation d'un angle β également dans le sens direct. Un mode optique polarisé linéairement dans la même direction de polarisation que celle de l'émission stimulée dans le milieu laser est amplifié avec un gain maximal et peut ainsi osciller de façon efficace. Lorsqu'un tel mode intracavité effectue un tour complet de cavité en
25 subissant d'abord l'effet réciproque puis l'effet non réciproque, son plan de polarisation tourne d'un angle θ_{direct} égal à $\alpha + \beta$ dans un sens appelé sens direct et d'un angle θ_{inverse} égal à $\alpha - \beta$ dans le sens opposé. Dans le sens direct, seule la projection de la polarisation parallèle à la direction de polarisation de l'émission stimulée est amplifiée. Cette projection est
30 proportionnelle à l'angle θ_{direct} . Lorsqu'un mode optique intracavité effectue un tour complet en sens inverse, seule la projection de la polarisation parallèle à la direction de polarisation de l'émission stimulée est également amplifiée. Cette projection est proportionnelle à l'angle θ_{inverse} .

Par conséquent, le gain de l'amplification dans le milieu laser est
35 différent selon le sens de propagation et dépend directement de l'importance

des effets subis par la polarisation des deux modes. Il est ainsi possible de faire varier de façon différente les intensités des modes contre-propageants en faisant varier au moins l'une des deux valeurs des effets subis par les polarisations des deux modes. Pour réaliser cette fonction d'asservissement, une partie des faisceaux 5 et 6 est prélevée, par exemple, au moyen de deux lames semi-réfléchissantes 43 et envoyée sur les deux photo-détecteurs 42 comme indiqué sur la figure 3. Les signaux issus de ces deux photo-détecteurs sont représentatifs de l'intensité lumineuse des deux modes optiques contre-propageants 5 et 6. Lesdits signaux sont envoyés au module électronique d'asservissement 4 qui pilote, en fonction de l'intensité des signaux reçus, le dispositif à effet variable comprenant les éléments 7 et 8 (flèches en pointillés sur le schéma). Cela va se traduire par des variations des états de polarisation des deux modes contre-propageants 5 et 6. Ces variations d'états de polarisation entraînent alors des gains optiques différents sur les modes optiques contre-propageants 5 et 6 chaque fois qu'après avoir effectué une rotation complète, les modes traversent de nouveau le milieu amplificateur 19. Ces gains sont fonction de l'intensité des faisceaux contre-propageants. Si l'un des faisceaux a une intensité lumineuse supérieure à l'autre, son intensité sera moins augmentée par le dispositif d'asservissement de façon à ramener les faisceaux de sortie au même niveau d'intensité. On stabilise ainsi le régime bidirectionnel en intensité.

Bien entendu, le dispositif selon l'invention peut être adapté à toute combinaison de rotations réciproques, de lames d'onde, de polariseurs et de rotateurs non réciproques agissant sur l'état de polarisation de la lumière telle que ladite combinaison puisse être transformée en variation de gain par le milieu laser. Dans une cavité réelle, différents types de composants (miroirs de la cavité, milieu amplificateur,...) peuvent en outre influencer l'état de polarisation des faisceaux optiques ainsi que leur intensité. Pour connaître exactement les paramètres des faisceaux contre-propageants après un tour complet de la cavité, on utilise le formalisme des matrices de Jones. Celui-ci consiste à représenter l'influence d'un composant sur l'état de polarisation par une matrice 2x2 référencée dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation des faisceaux. En général, les axes du repère choisi correspondent aux axes principaux d'un polariseur

intra-cavité, ce qui facilite la représentation mathématique. Pour connaître l'influence résultante de l'ensemble des composants intra-cavité, il suffit alors de faire le produit des différentes matrices représentatives de ces composants. Ce produit n'étant pas commutatif et l'expression de certaines

5 matrices de Jones dépendant du sens de propagation, l'influence pourra être différente selon le sens de propagation des faisceaux. On démontre qu'au moins un rotateur non réciproque, et un rotateur réciproque ou une lame d'onde ou un polariseur sont nécessaires pour obtenir cet effet.

10 Il existe différentes méthodes pour réaliser des rotateurs réciproques fixes.

L'élément optique peut être un polariseur linéaire dont la direction de polarisation n'est pas parallèle à la direction de gain maximal du milieu amplificateur.

15 Il est également possible d'obtenir une rotation réciproque fixe en utilisant un rotateur optique naturel comme une lame optique biréfringente, obtenue par exemple à partir d'un matériau naturellement biréfringent comme le quartz.

On peut aussi agir sur les états de polarisation en utilisant une

20 lame d'onde. Bien entendu, cette lame d'onde peut être rendue solidaire d'un des miroirs de la cavité de façon à simplifier la réalisation du dispositif.

Dans un second mode de réalisation selon l'invention, on peut notamment utiliser comme il est décrit sur les figures 4a et 4b une cavité non

25 plane à la place d'un élément optique agissant sur l'état de polarisation des modes contre-propageants. Soit une cavité 1 comportant au moins quatre miroirs 11, 12, 13 et 14. Il est possible de les disposer comme indiqué sur la figure 4a de telle sorte que les faisceaux contre-propageants se propagent dans un plan (plan (X,Y) de la figure 4a). Dans ce cas, si ces

30 faisceaux sont polarisés linéairement, la direction de polarisation se conserve. Il est également possible de les disposer de telle sorte que les faisceaux contre-propageants ne se propagent plus dans un plan comme il est indiqué, par exemple, sur la figure 4b où le miroir 12 a été déplacé sur l'axe des Z. Dans ce cas, on démontre que la direction de polarisation des

35 faisceaux contre-propageants a tourné d'un angle dépendant de la géométrie

de la cavité lorsque le faisceau a fait un tour complet de la cavité. (A.C. Nilsson, E.K.Gustafson and R.L.Byer – Eigenpolarization Theory of Monolithic Nonplanar Ring Oscillators – IEEE Journal of Quantum Electronics 25 (4) 767-790 (1989)). Cette propriété peut être utilisée pour
5 réaliser des cavités selon l'invention. Dans ce cas, il reste à disposer un rotateur non réciproque variable à l'intérieur de la cavité non-planaire.

Pour réaliser la fonction optique équivalente à celle d'une lame d'onde variable, une solution possible consiste à utiliser un dispositif à
10 biréfringence contrôlable. Pour introduire une biréfringence contrôlable, on peut utiliser:

- des céramiques au Plomb, Lanthane, Zirconium et Titane ($Pb_{1-x}La_xZr_{1-y}Ti_yO_3$) dont on peut contrôler à la fois l'orientation des axes neutres et la biréfringence dans une zone en l'entourant d'électrodes et en appliquant un champ électrique de quelques centaines de volts. Ces
15 céramiques ont des épaisseurs de moins d'un millimètre, sont transmissives dans le proche infrarouge, ont des tensions de commande de quelques centaines de volts et un temps de réponse de l'ordre de la microseconde compatible avec la bande passante
20 nécessaire évaluée de quelques dizaines de KiloHertz.
- des valves à cristaux liquide d'un millimètre d'épaisseur environ (dont la zone active a une épaisseur d'environ 20 microns) ayant des tensions de commande de quelques dizaine de volts.
- des cellules de Pockels dont on modifie le déphasage en
25 changeant la tension appliquée (typiquement 1kiloVolts pour que le déphasage obtenu soit égal à $\pi/2$). Ces cellules, constituées de KDP ou de Niobate de Lithium, par exemple, sont identiques à celles utilisées pour déclencher un laser. Elles ont des épaisseurs de un à
30 deux centimètres et des pertes d'insertions faibles.

Pour réaliser une rotation non réciproque, on utilise généralement des dispositifs magnéto-optiques, par exemple à effet Faraday qui nécessitent pour fonctionner la génération d'un champ magnétique. Ces éléments à effet Faraday peuvent être notamment réalisés directement sur
35 les miroirs de la cavité au moyen de couches de matériau magnéto-optiques.

Si l'on souhaite obtenir une rotation non réciproque fixe, il suffit de réaliser un champ magnétique au moyen de circuits magnétiques à base d'aimants permanents. Si l'on souhaite obtenir un effet non réciproque variable, il suffit alors de créer un champ magnétique variable, par exemple, au moyen d'une bobine d'induction entourant le matériau à effet Faraday commandée par une intensité électrique réglable.

Lorsque le milieu s'y prête, il est avantageux d'utiliser le même élément comme milieu amplificateur et comme milieu à effet Faraday.

Avantageusement, un laser à état solide selon l'invention est réalisé à partir d'une cavité monolithique comme indiqué sur les figures 5 et 6. Cette configuration présente plusieurs avantages.

Les miroirs 11, 12 et 13 sont alors directement déposés sur les faces de la cavité monolithique. La cavité peut être réalisée directement dans le matériau servant de milieu amplificateur. La figure 6 montre un schéma de réalisation d'un gyrolaser selon l'invention utilisant une cavité de ce type. Le matériau 19 de la cavité sert également de milieu amplificateur. Dans ce cas, le pompage optique est réalisé au moyen d'une fibre 20 dont le faisceau 22 est focalisé à l'intérieur du milieu amplificateur au moyen d'une lentille 21. Les éléments 7 et 8 sont représentés en pointillés sur cette figure.

La cavité monolithique peut également être non-planaire. On obtient ainsi directement la rotation réciproque par la forme même de la cavité. Dans l'exemple de la figure 7, la cavité est une lame épaisse comportant deux faces planes et parallèles 195 et 196 entre elles et quatre faces latérales inclinées 191, 192, 193 et 194. La forme générale de la lame est celle d'un coin tronqué. L'inclinaison des faces latérales est choisie de sorte que les faisceaux lumineux parcourent la cavité suivant un losange brisé comme indiqué sur la figure 7.

Un des autres avantages de la cavité monolithique est d'utiliser le milieu amplificateur 19 comme milieu à effet Faraday. Dans ce cas, l'obtention d'un champ magnétique variable est obtenu en entourant la cavité monolithique d'une bobine d'induction 73 comme illustré en figure 8a. Il est également possible, afin d'améliorer l'efficacité du champ magnétique de n'entourer qu'une partie de la cavité avec une ou plusieurs bobines d'induction comme illustré en figure 8b. Dans ce cas, la cavité doit être

percée pour laisser passer les fils électriques constituant les bobines d'induction.

L'obtention d'un champ magnétique fixe est obtenue en disposant sur la cavité monolithique d'aimants permanents 74 comme illustré en figure

5 9.

REVENDEICATIONS

5

1. Gyrolaser comportant au moins une cavité optique (1) en anneau, un milieu amplificateur (19) à l'état solide et un système d'asservissement (4, 42, 43), deux modes optiques (5, 6) dits contre-propageants pouvant se propager en sens inverse l'un de l'autre à l'intérieur de ladite cavité optique, le système d'asservissement étant destiné à asservir l'intensité des deux modes contre-propageants, caractérisé en ce que le milieu amplificateur (19) est anisotrope et que le système d'asservissement comporte au moins, à l'intérieur de la cavité, un ensemble optique comprenant au moins un élément optique (7) agissant sur l'état de polarisation des modes contre-propageants et un rotateur à effet non réciproque (8) agissant également sur l'état de polarisation des modes contre-propageants, au moins l'un des effets dudit élément optique (7) ou dudit rotateur (8) à effet non réciproque étant réglable.

20

2. Gyrolaser selon la revendication 1, caractérisé en ce que lorsque, l'élément optique (7) agit sur l'état de polarisation des modes contre-propageants de façon fixe, ledit élément est un polariseur linéaire dont la direction de polarisation n'est pas parallèle à la direction de gain maximal du milieu amplificateur.

25

3. Gyrolaser selon la revendication 1, caractérisé en ce que, lorsque l'élément optique (7) agit sur l'état de polarisation des modes contre-propageants de façon fixe, ledit élément est une lame optique biréfringente.

30

4. Gyrolaser selon la revendication 3, caractérisé en ce que ledit élément optique (7) est une lame optique biréfringente obtenue à partir d'un matériau naturellement biréfringent.

5. Gyrolaser selon la revendication 4, caractérisé en ce que ledit élément optique (7) est en quartz.

35

6. Gyrolaser selon les revendication 1, caractérisé en ce que, lorsque l'élément optique (7) agit sur l'état de polarisation des modes contre-propageants de façon réglable, ledit élément est une lame optique à biréfringence électriquement contrôlée.

5

7. Gyrolaser selon la revendication 1, caractérisé en ce que, lorsque le rotateur à effet non réciproque agit sur l'état de polarisation des modes contre-propageants de façon fixe, il comprend un matériau à effet Faraday polarisé par un aimant permanent.

10

8. Gyrolaser comportant au moins une cavité optique (1) en anneau, un milieu amplificateur (19) à l'état solide et un système d'asservissement (4, 42, 43), deux modes optiques (5, 6) dits contre-propageants pouvant se propager en sens inverse l'un de l'autre à l'intérieur de ladite cavité optique, le système d'asservissement étant destiné à asservir l'intensité des deux modes contre-propageants, caractérisé en ce que le milieu amplificateur (19) est anisotrope, que la cavité (1) est non planaire, c'est-à-dire que les modes contre-propageants ne se propagent pas dans un plan unique et que le système d'asservissement comporte au moins, à l'intérieur de la cavité (1), un rotateur à effet non réciproque (8) réglable.

20

9. Gyrolaser selon les revendications 1 ou 8, caractérisé en ce que, lorsque le dispositif à effet non réciproque agit sur l'état de polarisation des modes contre-propageants de façon réglable, il comprend un matériau à effet Faraday polarisé par une bobine d'induction (73) commandée par une intensité électrique réglable.

25

10. Gyrolaser selon les revendications 7 ou 9, caractérisé en ce que le milieu amplificateur et le matériau à effet Faraday sont réalisés dans le même matériau.

30

11. Gyrolaser selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la cavité est monolithique.

35

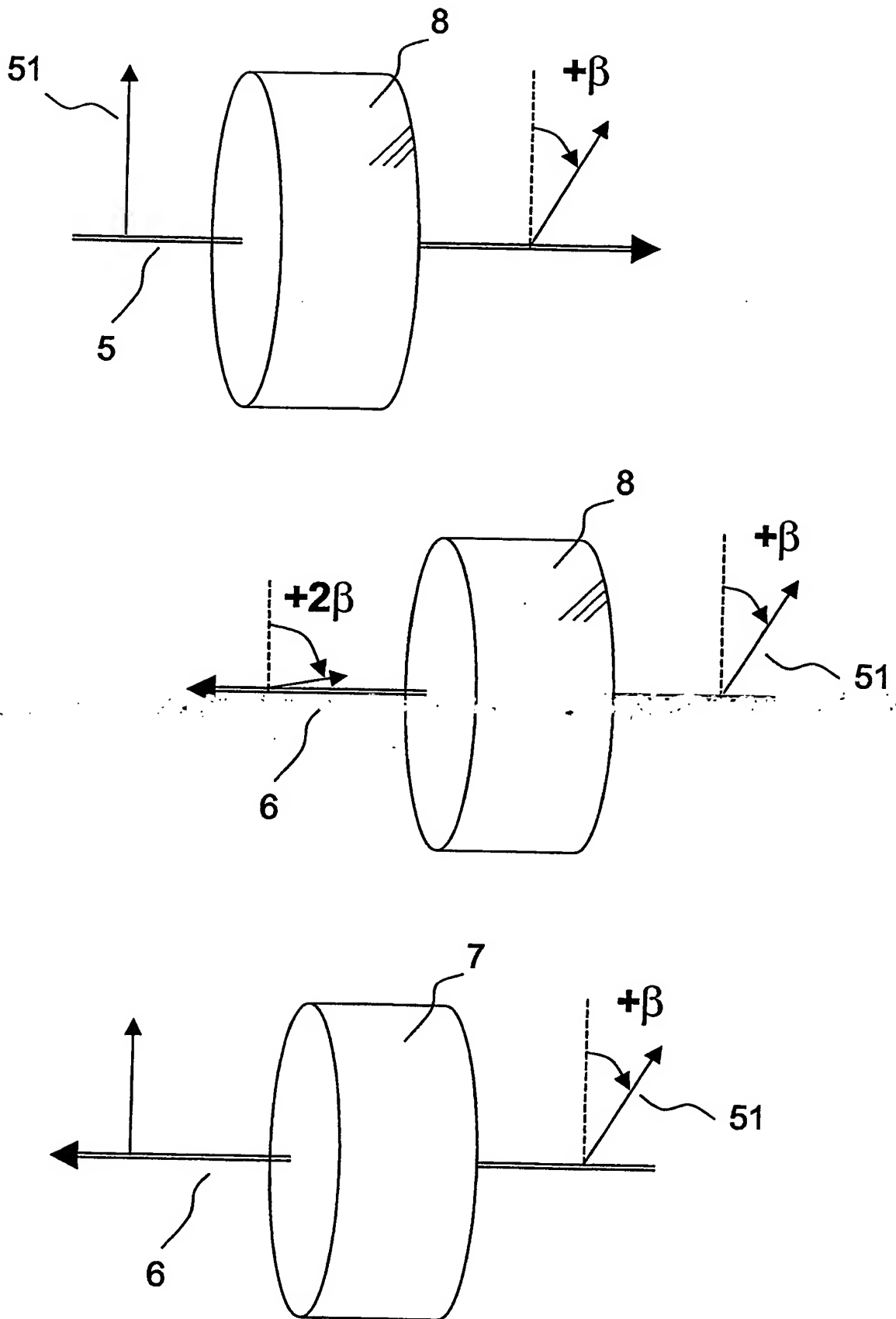


FIG.1

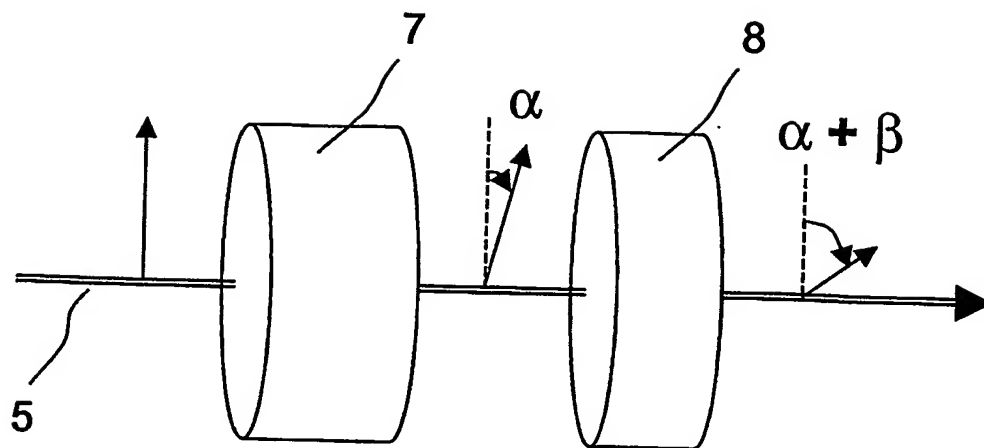


FIG. 2a

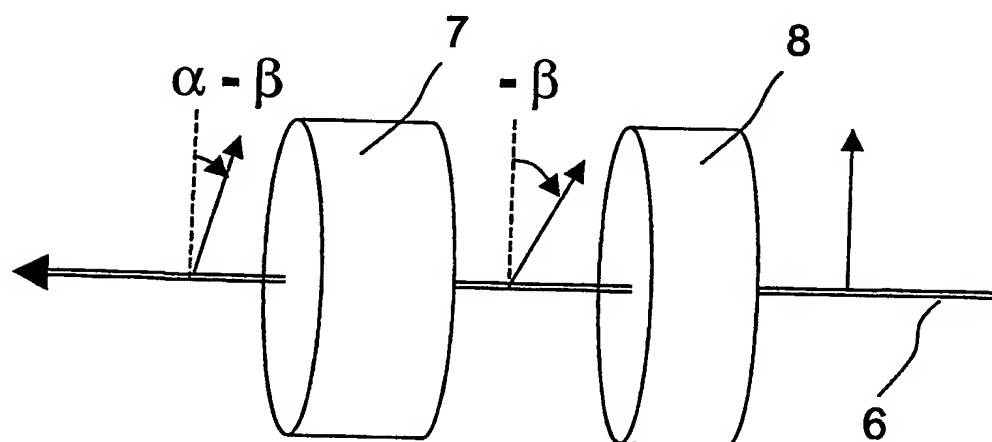


FIG. 2b

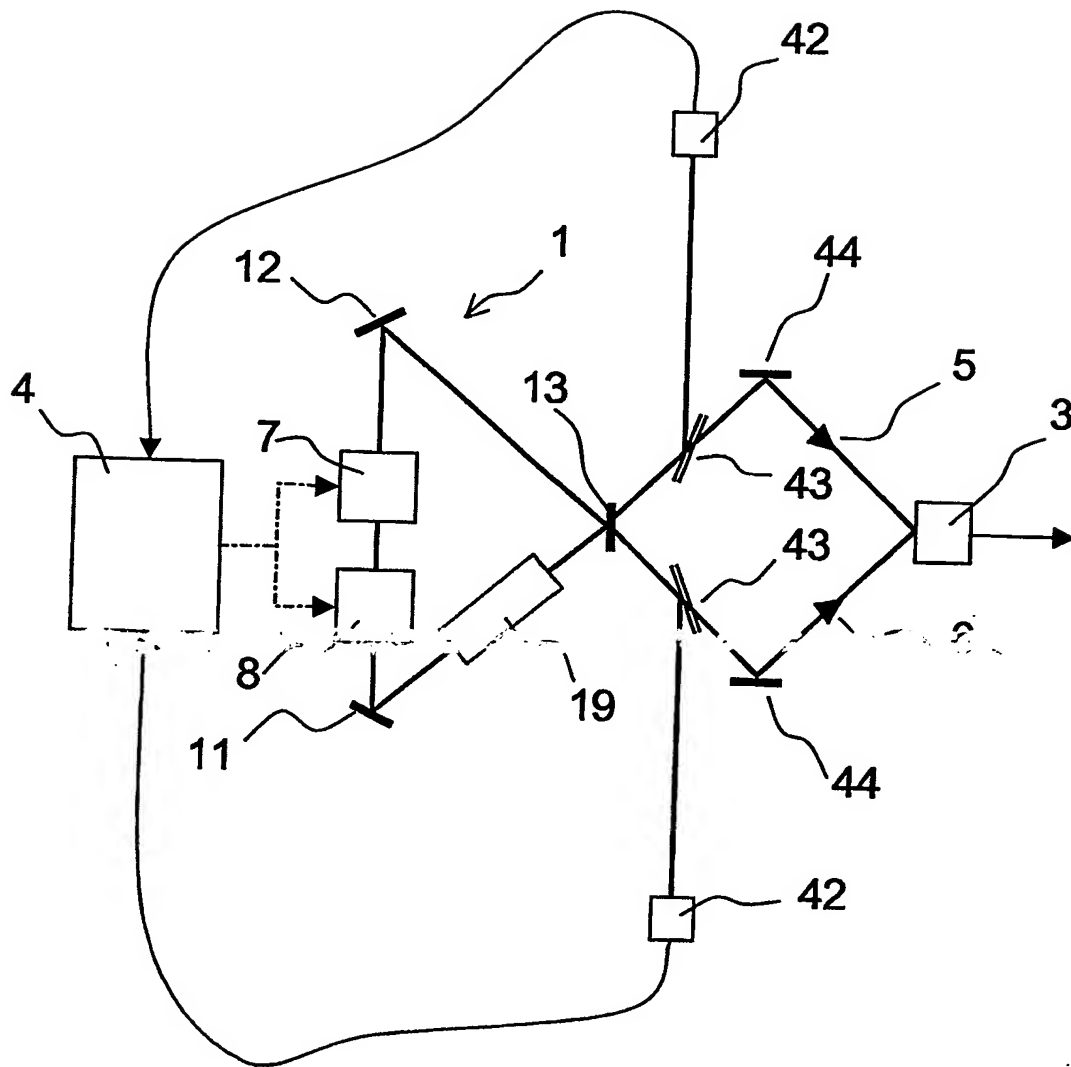
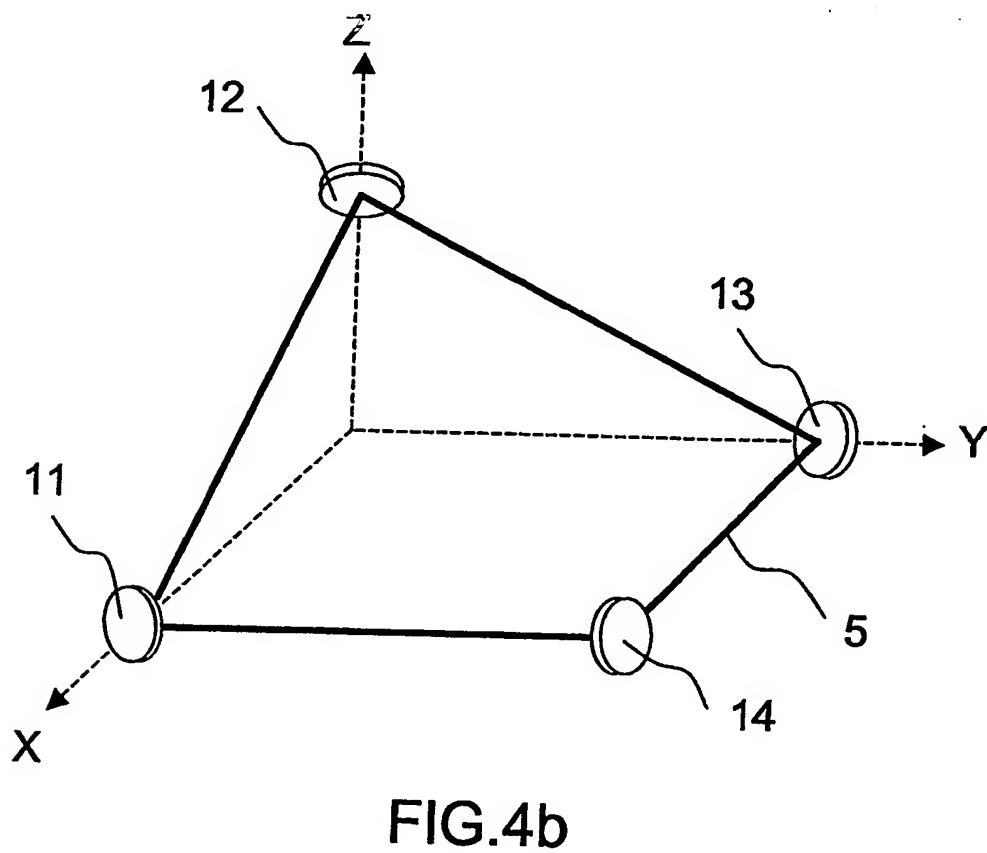
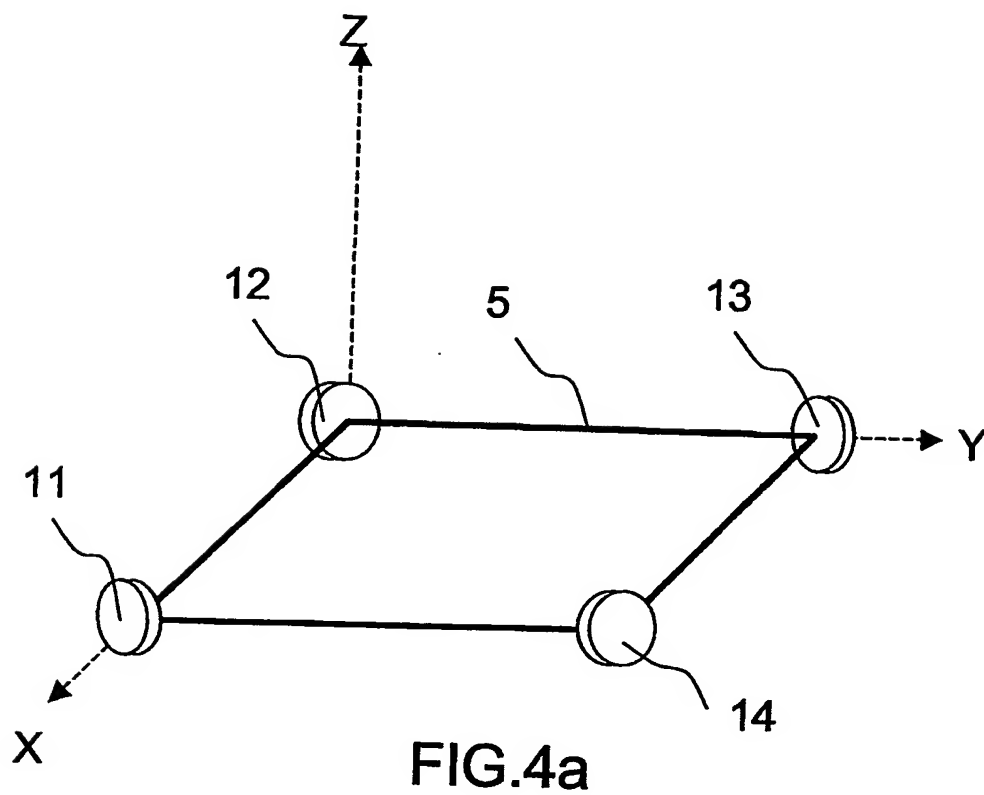


FIG.3



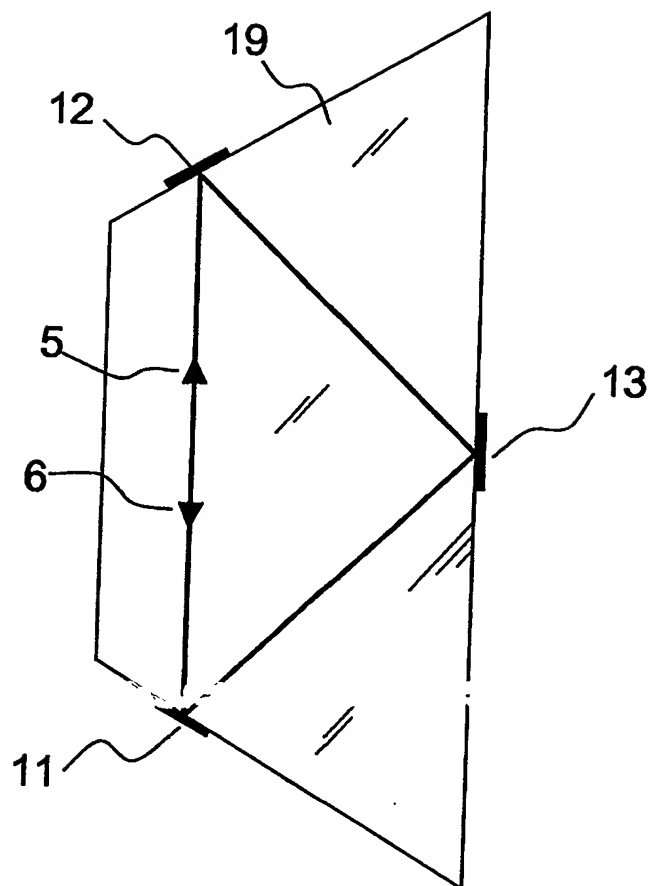


FIG.5

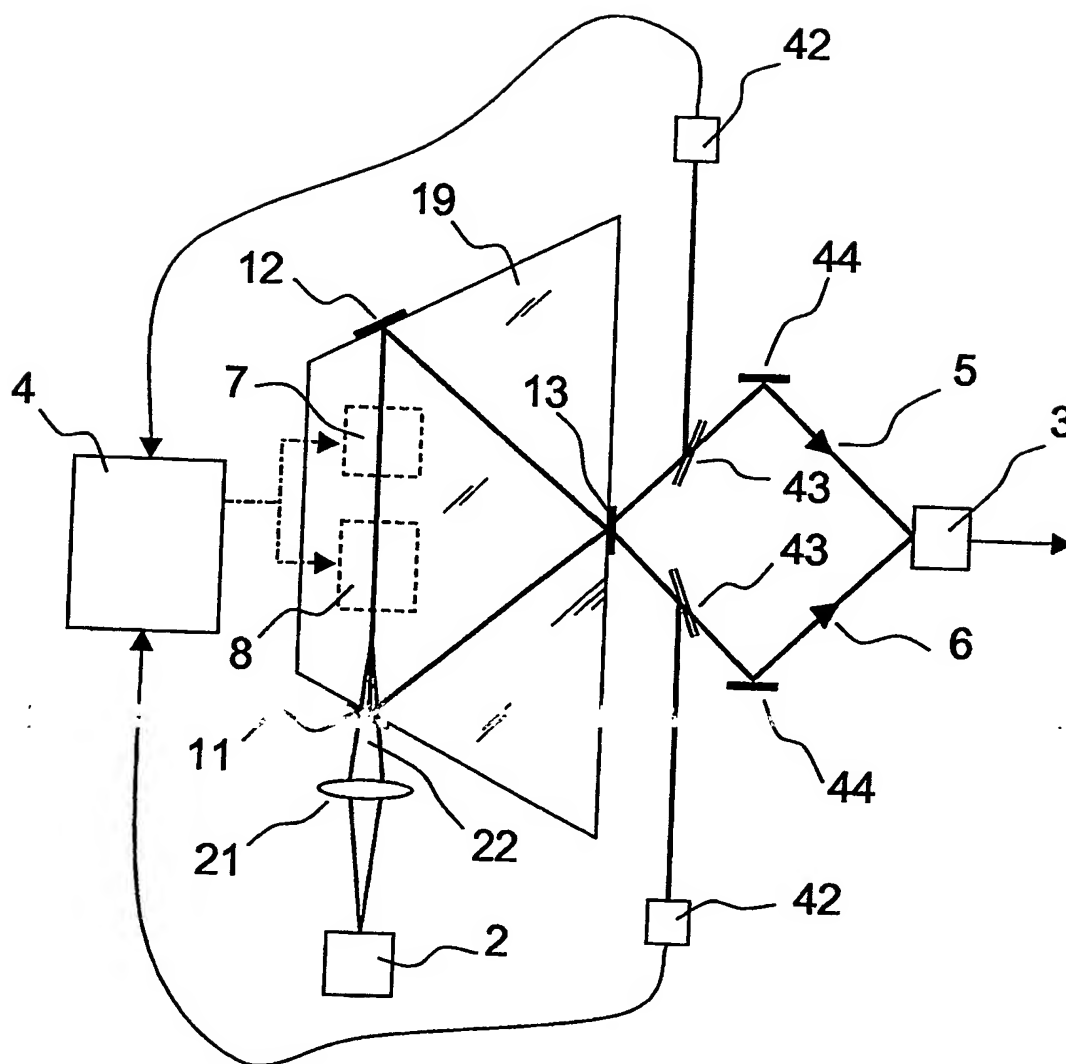


FIG.6

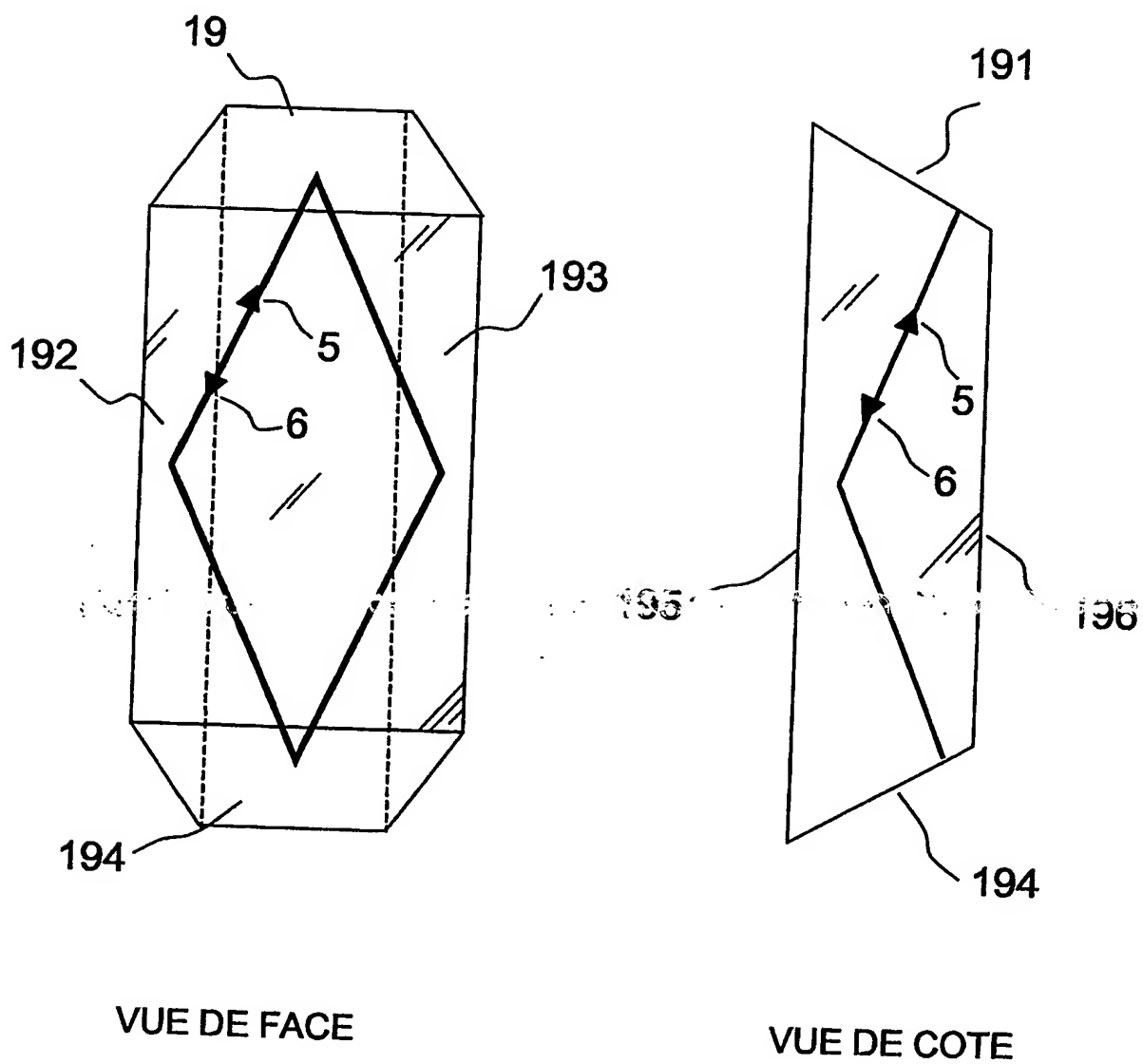


FIG.7

8/9

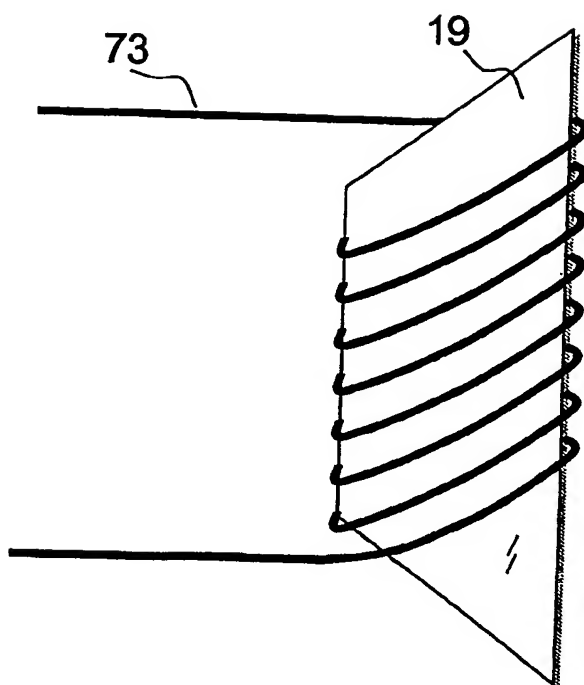


FIG. 8a

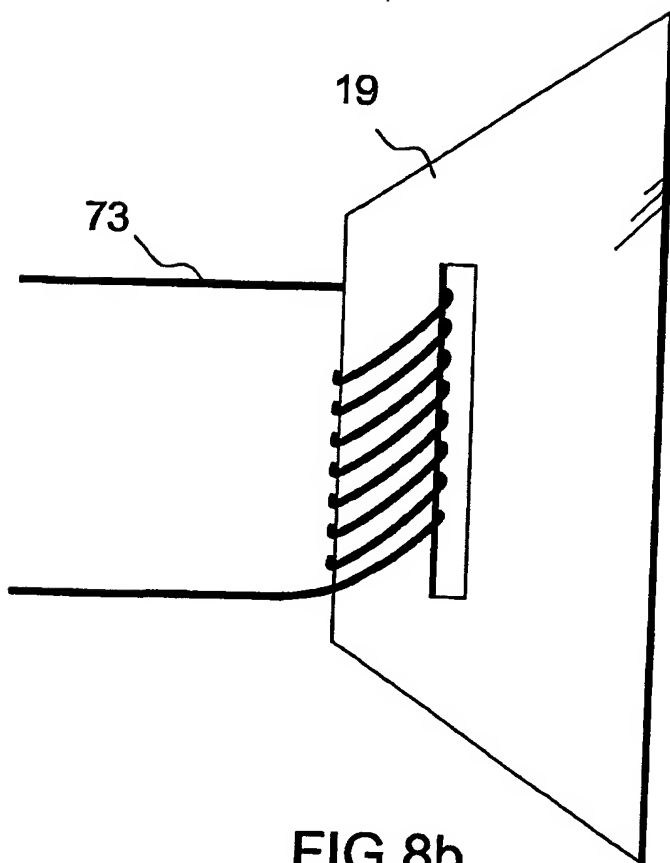


FIG. 8b

9/9

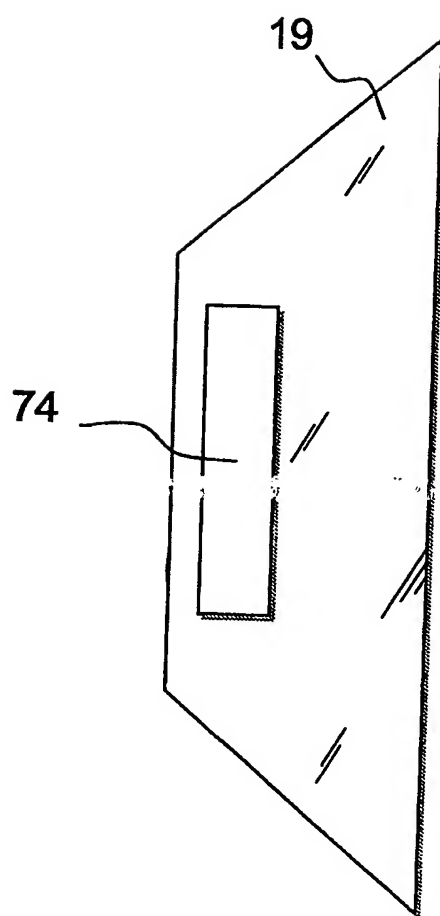


FIG.9

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record.**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER: _____**

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.